

ナノ・スピン実験施設の目標と成果(研究活動)

雑誌名	東北大学電気通信研究所研究活動報告
巻	11
ページ	56-63
発行年	2005-08
URL	http://hdl.handle.net/10097/30494

3. 5 ナノ・スピン実験施設の目標と成果

「ナノ・スピン実験施設」は、本研究所附属研究施設として平成16年4月1日に設置された。その目的は、情報通信を支えるナノエレクトロニクス・スピントロニクス基盤技術を創生することにある。これを実現するため、「IT プログラムにおける研究開発推進のための環境整備」によって整備されたナノ・スピン総合研究棟とその主要設備を用いて、本研究所および本所と密接な関係にある本学電気・情報系の各研究分野と共にナノテクノロジーに基づいた電子の電荷・スピンを駆使する基盤的材料デバイス技術の研究開発を進め、さらに全国・世界の電気通信分野の研究者の英知を結集した共同プロジェクト研究を推進する。

現在、ナノ・スピン総合研究棟では、「ナノ・スピン実験施設」の3研究部、すなわちナノヘテロプロセス研究部、半導体スピントロニクス研究部、ナノ分子デバイス研究部と施設共通部、及び知的ナノ集積システム研究部、量子光情報工学研究分野が入居し連携して研究を進めている。

ナノヘテロプロセス研究部では、Siの物性限界・微細化限界を超えて電荷を究極制御するために、表面・界面が原子精度で制御されたナノヘテロIV族半導体製作技術とナノ立体加工技術の確立と同時に、原子精度ナノヘテロデバイス製作プロセスを構築する。

半導体スピントロニクス研究部では、スピンを用いた演算・記憶・伝送機能のデバイス化、スピンを用いた量子情報処理機能の探索、量子構造における赤外・テラヘルツレーザ光発生、を中心に電荷・スピンの自由度を用いた情報通信機能を実現する。

ナノ分子デバイス研究部では、超分子、有機半導体やDNAなどの生体分子など、電子や光に多様に応答する分子を活用した新たな分子デバイスの開発や、分子認識をベースとした生体情報を物理信号に変換する生体分子情報処理デバイスの開発を行う。

今後施設にはナノ量子回路研究部、ナノスピンメモリ研究部が整備される予定である。これらの陣容で、上記基盤技術を創生し、ナノエレクトロニクス・スピントロニクスにおける世界のCOE となることを目標としている。

～情報通信を支えるナノ・スピン基盤技術の創生～



ナノヘテロプロセス研究部

半導体立体ナノ構造の実現と応用のための 基盤技術の研究

薄膜形成やエッチングを原子オーダーの精度で制御するプロセス技術の開発は、将来の超大規模集積回路（ULSI）の大容量化・高速化や量子効果を積極的に利用した新機能デバイス製作、さらに、従来のバルク材料とは異なる未知の新物性を持つ材料の創生のために極めて重要である。本研究部は、Siの物性限界・微細化限界を超えて、電荷の究極制御をSi集積回路にオンチップで達成するために、表面・界面が原子精度で制御されたナノヘテロ人工IV族半導体製作技術とナノ立体加工技術をモレキュラー制御により確立すると同時に、原子精度ナノヘテロデバイス製作プロセスを構築することを目標とする。（図1）

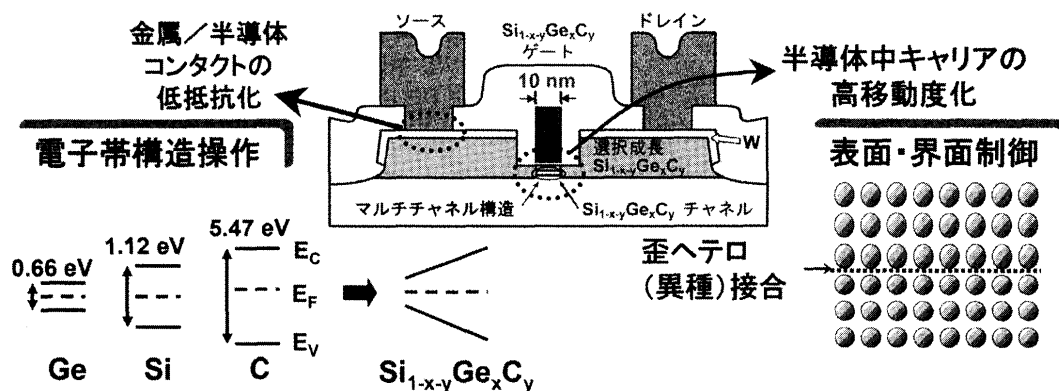


図1. ナノヘテロ人工IV族半導体の創成とナノヘテロデバイスへの応用。

【ナノヘテロ人工IV族半導体製作技術とナノ立体加工技術】

表面・界面が原子精度で制御されたナノヘテロ人工IV族半導体を製作するためには、ヘテロ界面での相互拡散を抑制することが不可欠であり、成膜温度の低温化がポイントとなる。本年度は、ECR Arプラズマ照射下でのGeH₄表面反応について調べた結果、基板非加熱下のSi(100)基板上に高度に歪んだGe薄膜がエピタキシャル成長し、膜厚・イオンエネルギーの増加とともに歪緩和が進行することを見いだした。（図2）また、従来の熱CVD法では異種表面での成長初期に表面荒れが起こりやすいが、上記で得られたGe薄膜は厚さ1 nm以下から数十nmにわたって、原子レベルで表面平坦性に優れることを確認した。さらに、Si(100)基板上において、Arプラズマ照射下でのN₂表面反応による原子層窒化とその上でのSiH₄表面反応によるSiエピタキシャル成長条件を見だし、超高

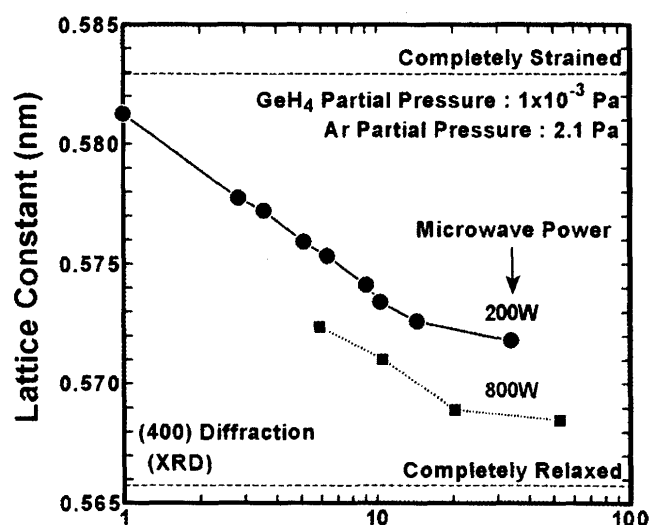


図2. 基板非加熱下でSi(100)上にエピタキシャル成長したGe薄膜の厚さ方向格子定数の膜厚依存性。

濃度NデルタドーブSiエピタキシャル薄膜の形成に成功した。このように、高品質ナノヘテロ人工IV族半導体構造の実現を目指し、そのために不可欠となるナノオーダー厚さの異種薄膜および超高濃度不純物ドーブ薄膜の積層について研究を進めている。

【ナノヘテロデバイス製作プロセス】

人工IV族半導体のナノ立体加工のために異方性エッチング制御技術が重要となる。本年度は、塩素プラズマによる $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 薄膜の異方性エッチング過程における側壁形状の改善と塩素に添加する窒素あるいは酸素の分圧比との関係に着目し、側壁上に形成されるSi窒化膜あるいはGe酸化膜が塩素ラジカルによるサイドエッチングを効果的に抑制する結果、エッチング異方性が向上することを見いだした。現在、さらに、立体加工したナノヘテロ人工IV族半導体の物性とそのデバイス応用についても研究を進めている。

〈職員〉

教授 室田 淳一 (1995年より)
 助教授 櫻庭 政夫 (2002年より)
 助手 竹廣 忍 (2002年より)

〈室田淳一教授のプロフィール〉

1948年生まれ。1970年北大・工・電子卒。1972年同大学院修士課程修了。同年日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所入所。1983年同公社厚木電気通信研究所を経て、1985年東北大学電気通信研究所助教授、1995年同教授、現在に至る。半導体プロセスの研究に従事。

〈研究テーマ〉

1. Si-Ge-C系IV族半導体の原子精度極限ヘテロ積層に関する研究
2. IV族半導体ナノヘテロ積層構造への不純物層挿入に関する研究
3. ヘテロ積層構造の3次元ナノ立体加工に関する研究
4. ヘテロ積層立体ナノ構造物性に関する研究
5. ナノヘテロ立体構造形成装置技術に関する研究
6. Siベースナノヘテロデバイス製作プロセスに関する研究

〈主な研究発表 (2004年度)〉

1. Atomically Controlled Ge Epitaxial Growth on Si(100) in Ar Plasma Enhanced GeH_4 Reaction, K. Sugawara, M. Sakuraba and J. Murota, Mat. Sci. Semiconductor Processing, Vol.8, pp.69-72, (2005).
2. Electrical Properties of W Delta Doped Si Epitaxial Films Grown on Si(100) by Ultraclean Low-Pressure Chemical Vapor Deposition, T. Kurosawa, T. Komatsu, M. Sakuraba and J. Murota, *ibid.*, Vol.8, pp.125-129, (2005).
3. Electrical Properties of N Atomic Layer Doped Si Epitaxial Films Grown by Ultraclean Low-Pressure Chemical Vapor Deposition, Y. Jeong, M. Sakuraba and J. Murota, *ibid.*, Vol.8, pp.121-124, (2005).
4. Si Epitaxial Growth on Atomic-Order Nitrided Si(100) Using Electron Cyclotron Resonance Plasma, M. Mori, T. Seino, D. Muto, M. Sakuraba and J. Murota, *ibid.*, Vol.8, pp.65-68, (2005).
5. Sidewall Protection by Nitrogen and Oxygen in Poly- $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ Anisotropic Etching Using $\text{Cl}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$ Plasma, H.-S. Cho, S. Takehiro, M. Sakuraba and J. Murota, *ibid.*, Vol.8, pp.239-243, (2005).
6. Integration of Si p-i-n Diodes for Light Emitter and Detector with Optical Waveguides, A. Yamada, M. Sakuraba and J. Murota, *ibid.*, Vol.8, pp.435-438, (2005).
7. Atomically Controlled Impurity Doping in Si-Based CVD Epitaxial Growth (Invited Paper), J. Murota, M. Sakuraba, and B. Tillack, 2004 Mat. Res. Soc. Spring Meeting, Symp. B: High-Mobility Group-IV Materials and Devices, San Francisco, CA, Apr. 12-16, 2004.
8. Low-Temperature SiGe(C) Epitaxial Growth by Ultraclean Hot-Wall Low-Pressure CVD (Invited Paper), J. Murota, Proc. SiGe: Materials Processing and Device (The Electrochem. Soc., Pennington, NJ, 2004), PV.2004-07, pp.825-836.
9. Atomically Controlled Impurity Doping for Future Si-Based Devices (Invited Paper), J. Murota, M. Sakuraba and B. Tillack, 2004 Int. Conf. on Solid-State and Integrated-Circuit Technol. (ICSICT), Beijing, China, Oct. 18-21, 2004, pp.557-562.

他 学術雑誌7件, 国際会議発表論文32件

半導体スピントロニクス部

極微細波動基盤技術：

半導体スピントロニクスからテラヘルツ光の発生まで

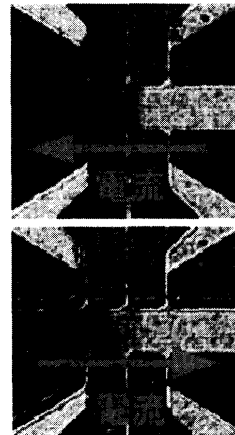
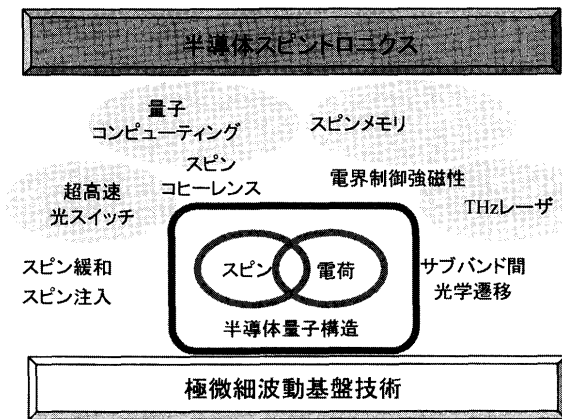


図 1. カー偏光顕微鏡により観測した (Ga,Mn)As の磁区構造。像の濃淡が磁化の上向き、下向き領域に相当する。電流により磁壁位置が移動し、素子の中心領域の磁化が反転していることが分かる。

1. 部の目標

半導体スピントロニクス部では、半導体内の電子状態を制御し工学的に応用するため極微細波動基盤技術の研究を進めている。具体的には、化合物半導体量子構造を対象に、新しい半導体材料の開発、量子構造の作製と性質の理解、それらの超高速電子デバイス応用に関する研究を行っている。特に、スピンと電荷の自由度の両方を使った半導体スピントロニクスや、今後の情報通信に必要な半導体THzコヒーレント光源の実現を目指している。また、金属磁性体を用いたスピンメモリ素子の研究も精力的に行っている。

本研究室では、GaAs/AlAs, InAs/GaSb, GaN, ZnOなどの非磁性半導体と、III-V族ベースの新しい強磁性半導体(Ga,Mn)As, (In,Mn)As, 及び新しい閃亜鉛鉱型室強磁性体CrSbを取り上げ、分子線エピタキシ法で高品質な量子構造を成長している。これまでに、半導体スピントロニクスのための強磁性半導体/非磁性半導体量子構造の作製とそのスピン物性の解明を行うと共に、二次元電子間の量子輸送現象における新しいスピン現象を明らかにしてきた。また、InAs量子井戸中のサブバンド間の光学遷移によるレーザー発振を世界で初めて電流注入により実現した。更に、金属磁性体磁気抵抗素子において世界最高の出力を得ることに成功している。これらの研究により、固体材料中のスピンを用いたユニバーサルなメモリや現在のコンピュータが不得意な計算を桁違いに高速に実行できる量子コンピューティングなどの新しいデバイス・システムを実現することに力を注いでいる。

2. 過去1年間（2004年4月から2005年3月まで）の主な成果

- 2.1 (Ga,Mn)As中の電流による磁壁移動により、外部磁化に依らない強磁性半導体の磁化反転を世界で初めて実現した。電流方向により、再現性良く磁化方向を制御できることを示した。
- 2.2 (Ga,Mn)As/GaAs/(Ga,Mn)Asトンネル磁気抵抗素子において、フリー層に相当する(Ga,Mn)As層の磁化方向を素子に流すパルス電流方向で制御できることを示した。

2.3 GaAs/AlGaAs (110)量子井戸におけるキャリアスピン・核スピン相互作用のゲート電界による制御を実現し、相互作用の大きさと金属-絶縁体転移の関連性を明確にした。

2.4 InAs量子カスケード構造でサブバンド間遷移レーザ(波長 $14\mu\text{m}$)を低閾電流(1kA/cm^2 以下)で発振させ、中赤外領域固体レーザの高性能化への端緒を得た。

3. 職員名

教授：大野英男（1994年より）

助教授：大野裕三（2001年より）

助手：松倉文礼

助手：大谷啓太

非常勤研究員：池田正二

非常勤研究員：許 懐哲

非常勤研究員：李 永珉

4. 教授のプロフィール

1982年東京大学工学系研究科電子工学専攻修了。工学博士。1982年北海道大学講師，1983年北海道大学助教授，1988-1990年IBM T. J. Watson研究所客員研究員，1994年より東北大学教授。第12回日本IBM科学賞，2003年度The IUPAP Magnetism Prize受賞。応用物理学会，日本結晶成長学会，日本物理学会，電子情報通信学会，APS，IEEE，AVS会員。

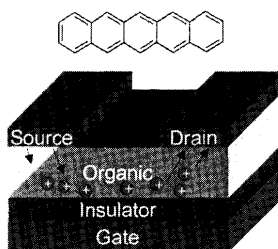
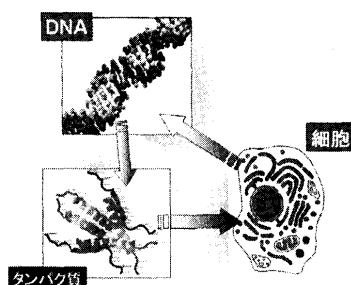
<研究テーマ>

1. 半導体スピントロニクスに関する研究
 - (a) 強磁性半導体およびその量子構造の物性と応用
 - (b) 半導体スピンメモリの開発
 - (c) 半導体量子構造中のスピンコヒーレンスの研究と量子情報技術への応用
2. 量子構造によるTHz～遠赤外光発生の研究
3. 量子構造における量子輸送現象の研究
4. 半導体量子構造に関する研究
5. 金属磁性体素子とそのメモリへの応用に関する研究

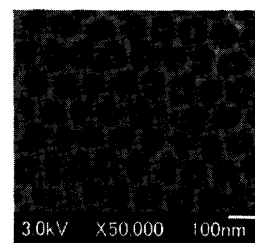
5. 過去1年間（2004年4月から2005年3月まで）の主な発表論文

1. H. Sanada, S. Matsuzaka, K. Morita, C. Y. Hu, Y. Ohno, and H. Ohno, "Gate Control of Dynamic Nuclear Polarization in GaAs Quantum Wells" Phys. Rev. Lett. 94, pp. 097601_1-4, March 2005.
2. A. Tsukazaki, A. Ohtomo, T. Onuma, M. Ohtani, T. Makino, M. Sumiya, K. Ohtani, S. Chichibu, S. Fuke, Y. Segawa, H. Ohno, H. Koinuma, and M. Kawasaki, "Repeated temperature modulation epitaxy for p-type doping and light-emitting diode based on ZnO," Nature Materials, 4, pp. 42-46, Dec. 2004.
3. Y. Li, C. Ren, P. Xiong, S. von Molnar, Y. Ohno, and H. Ohno, "Modulation of noise in submicron GaAs/AlGaAs Hall devices by gating," Phys. Rev. Lett. 93, 22602_1-4, Dec. 2004.
4. D. Chiba, Y. Sato, T. Kita, F. Matsukura, and H. Ohno, "Current-Driven Magnetization Reversal in a Ferromagnetic Semiconductor (Ga,Mn)As/GaAs/(Ga,Mn)As Tunnel Junction," Phys. Rev. Lett. 93, 21602_1-4, Nov. 2004.
5. D. Chiba, M. Yamanouchi, F. Matsukura, and H. Ohno, "Control of magnetization reversal in ferromagnetic semiconductors by electrical means," J. Phys.: Cond. Matter. 16, pp. S5693-5696, Nov. 2004.
6. T. I. Suzuki, A. Ohtomo, A. Tsukazaki, F. Sato, J. Nishii, H. Ohno, and M. Kawasaki, "Hall and field-effect mobilities of electrons accumulated at a lattice-matched at a lattice-matched ZnO/ScAlMgO₄ heterointerface," Advanced Materials 16, pp. 1887-1890, Nov. 2004.
7. J. Hayakawa, K. Ito, M. Fujimori, S. Heike, T. Hashizume, J. Steen, J. Brugger, and H. Ohno, "Current-driven switching of exchanged biased spin-valve giant magnetoresistive nanopillars using a conducting nanoprobe," J. Appl. Phys. 96, pp. 3440-3442, Sep. 2004.
8. K. Ohtani, K. Fujita, and H. Ohno, "A Low Threshold Current Density InAs/AlGaSb Supperlattice Quantum Cascade Laser Operating at $14\mu\text{m}$," Jpn. J. Appl. Phys. 43, pp. L879-881, June 2004.
9. H. Ohno, "Ferromagnetic semiconductor heterostructures," J. Magn. Magn. Mater. 272-276, pp. 1-6, 2004.
10. M. Yamanouchi, D. Chiba, F. Matsukura, and H. Ohno, "Current-induced domain-wall switching in a ferromagnetic semiconductor structure," Nature 428, pp. 539-542, April 2004.

ナノ分子デバイス研究部

分子情報デバイスの表面・界面のナノスケール制御と
新機能ナノ分子デバイスの創製

有機半導体デバイス



ポーラスアルミナ規則ナノ構造のSi基板表面への転写

1. 分野の目標

情報デバイスにおいて要求される処理能力は年々増加の一途を辿っており、今後、より大量の情報を高速に処理していくためには、今までの無機半導体を中心としたデバイスだけでなく、有機半導体さらにはDNAなどの生体分子をも含めた、電子や光に多様に応答する分子・超分子を活用した新たなナノ分子デバイスの開発が必要となる。また、今後ますますその重要性が増すゲノム情報を処理するためには、バイオテクノロジーと融合した生命情報処理デバイスの開発も不可欠である。このような時代の要請に応えるために、次世代の分子情報デバイスの創製に必要な、新機能分子材料の探索とともに、20世紀に培ったSi半導体技術を基盤にして、これら分子材料をSi半導体と様々な形で融合した新しいデバイスの実現に向けた基盤研究を行うことを分野の目標としている。

2. 過去1年間の主な研究成果

(1) ポーラスSiを利用した生体分子の高感度検出

DNAが1本鎖から2本鎖になるとき、すなわちDNAがハイブリダイゼーション（相補対形成）するとき、その変化は赤外吸収スペクトルに現れることを多重内部反射型赤外吸収分光法を用いて確認した。この結果をDNAマイクロアレイへ応用するためには、微細領域でのDNAの検出が不可欠である。そこで、十数 μm の空間分解能を有する顕微赤外分光法を用いたDNAの検出を試みた。しかしながら、顕微赤外吸収分光法では光量及び吸収体の量が微量なため、そのS/Nは一般的に低く、DNAを検出することはできない。そこで、膨大な表面積を有するポーラスシリコン(por-Si)薄膜にDNAを固定化し吸収体の量を増やすことにより、DNAの検出に成功した。この結果は、赤外分光法を用いたDNAチップが実現可能であることを示している。

(2) ポーラスアルミナ規則ナノ構造のSi基板表面への転写

赤外分光法を用いたSi基板表面上でのAl薄膜の陽極酸化過程のその場解析及びSEMによる観察により、Al/Si界面での電解液の振る舞いが形成したポーラスアルミナ膜底部の形状変化、剥離に大きな影響を与えていることがわかった。また、ポー

ラスアルミナ薄膜をマスクとしてSi表面を電気化学的にエッチングすることにより、ポーラスアルミナの規則構造（蜂の巣構造）をSi基板表面へ転写することに成功し、電気化学という安価な手法のみにてSi規則ナノ構造が形成できることが示された。

（３）有機半導体における光誘起ドーピング機構の観察

チオフェン薄膜に対して遮光下で酸素ドーピングを行うとチオフェンのカチオンが生成されることを多重内部反射赤外分光（MIR-IRAS）測定から直接観測することに成功した。さらに、有機分子から酸素分子への電子移動反応が光吸収によって飛躍的に促進されることを見出し、「光誘起ドーピング」機構を提案した。また、光照射を終了した後も、生成した正孔は長時間にわたって膜中に維持されることもMIR-IRAS測定より明らかにした。このことは、光照射量を変えることで定量的にドーピングレベルを制御できることを示しており、新しいドーピング法としての展開が大いに期待される。

３．職員

教授 庭野 道夫（1998年より）
 助教授 石井 久夫（2002年より）
 助手 木村 康男（1999年より）

４．教授のプロファイル

昭55東北大学大学院理学研究科博士課程修了。理学博士。昭55宮城教育大助手、昭61東北大学助手（電気通信研究所）、昭63助教授、平10教授。これまで固体光物性、半導体表面物性、半導体材料工学、表面化学の研究に従事。最近は、赤外分光による表面物性の研究や分子デバイスの開発研究に力を注いでいる。応用物理学会、表面科学会、日本物理学会、電気情報通信学会、電気学会などの会員。

５．過去１年間の主な研究発表論文

- [1] Hirokazu Shiraki, Yasuo Kimura, Hisao Ishii, Sachiko Ono, Kingo Itaya, and Michio Niwano, "Investigation of formation processes of an anodic porous alumina film on a silicon substrate", *Applied Surface Science* **237**, 369-373 (2004).
- [2] Yasuo Kimura, Hirokazu Shiraki, Hisao Ishii, Sachiko Ono, Kingo Itaya, and Michio Niwano, "In-situ Observation of Formation Processes of Anodic Porous Alumina on a Si Substrate Using Infrared Absorption Spectroscopy", *Materials Research Society Symposium Proceedings* **788**, L8.6.1-L8.6.5 (2004).
- [3] 篠原正典, 片桐輝昭, 岩辻圭太郎, 松田良信, 藤山寛, 木村康男, 庭野道夫, 「酸素プラズマ中でのSi 表面水素の挙動」, *表面科学* **25**, 541-547 (2004).
- [4] 小川賢, 木村康男, 石井久夫, 庭野道夫, 「変位電流評価法で調べたペンタセン有機電界効果トランジスタ界面のキャリア挙動」, *表面化学*, **25**, 513 (2004).
- [5] Ishii H, Hayashi N, Ito E, Washizu Y, Sugi K, Kimura Y, Niwano M, Ouchi Y, Seki K, "Kelvin probe study of band bending at organic semiconductor/metal interfaces: examination of Fermi level alignment", *PHYSICA STATUS SOLIDI A-APPLIED RESEARCH* **201**, 1075-1094 (2004).
- [6] Sugi K, Ishii H, Kimura Y, Niwano M, Ito E, Washizu Y, Hayashi N, Ouchi Y, Seki K, "Characterization of light-erasable giant surface potential built up in evaporated Alq(3) thin films", *THIN SOLID FILMS* **464-465**, 412-415 (2004).
- [7] Shinohara M, Katagiri T, Iwatsuji K, Matsuda Y, Fujiyama H, Kimura Y, Niwano M, "Oxygen-plasma induced hydrogen desorption from hydrogen-terminated Si(100) and (111) surfaces investigated by infrared spectroscopy", *THIN SOLID FILMS* **464-465**, 14-17 (2004).
- [8] Okamura K, Hosoi Y, Kimura Y, Ishii H, Niwano M, "Adsorption of cata-condensed aromatics on a Si(100)-2 x 1 surface investigated by infrared absorption spectroscopy", *APPLIED SURFACE SCIENCE* **237**, 439-443 (2004).
- [9] Shinohara M, Katagiri T, Iwatsuji K, Matsuda Y, Kimura Y, Niwano M, Fujiyama H, "Plasma oxidation process of silicon surfaces investigated by infrared spectroscopy", *JOURNAL OF ADVANCED OXIDATION TECHNOLOGIES* **8**, 41-46 (2005).

- [10] Okamura K, Ishii H, Kimura Y, Niwano M, "Adsorption of naphthalene on a Si(100)-2 x 1 surface investigated by infrared spectroscopy", SURFACE SCIENCE **576**, 45-55 (2005).
- [11] Shinohara M, Katagiri T, Iwatsuji K, Matsuda Y, Fujiyama H, Kimura Y, Niwano M, "Oxidation of the hydrogen terminated silicon surfaces by oxygen plasma investigated by in-situ infrared spectroscopy", THIN SOLID FILMS **475**, 128-132 (2005).
- [12] Miyamoto K, Ishibashi K, Hiroi K, Kimura Y, Ishii H, Niwano M, "Label-free detection and classification of DNA by surface vibration spectroscopy in conjugation with electrophoresis", APPLIED PHYSICS LETTERS **86** 053902-1- 053902-3 (2005).